نشریه ماشین‌های کشاورزی
جلد ۱۱، شماره ۲، نیمسال دوم ۱۴۰۰، ص ۱۸۵-۱۷۳

Journal of Agricultural Machinery
Vol. 11, No. 2, Fall- Winter 2021, p. 173-185

مقاله علمی-پژوهشی

بررسی عوامل موثر بر جداسازی پوسته و مغز بادام و طراحی و ساخت دستگاه جداساز پنوماتیکی

وحید نیساری فام[۱]، رضا طباطبائی کلور[۲*]، علی متولی[۳]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۴/۰۵
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۶/۲۰

چکیده

عملیات فراوری محصول بادام شامل سه مرحله شکستن پوسته چوبی، جداسازی مغز و بسته‌بندی است. در این پژوهش عوامل موثر بر جداسازی مغز بادام و پوسته آن مورد بررسی قرار گرفت و یک سیستم جداساز پنوماتیک ارائه گردید. برای این کار عواملی چون سرعت حد مغز بادام و پوست چوبی، تاثیر رطوبت، زاویه غلتش، نیروی شکست، طول تونل جداساز، دبی و توان پمپ مورد استفاده در دستگاه به‌دست آورده شد. سپس با داده‌های به‌دست آمده دستگاه طراحی و ساخته شد. به منظور ارزیابی دستگاه، تاثیر سه عامل سرعت باد در سه سطح ۷، ۵ و ۳ متر بر ثانیه، اندازه ذرات در چهار سطح مخلوط، درشت، متوسط و ریز و درصد رطوبت در سه سطح ۷٪، ۱۳٪ و ۱۹٪ بر عملکرد و میزان جدایش دستگاه بررسی گردید. آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار انجام شد. نتایج تجزیه واریانس نشان داد که همه اثرات اصلی، اثرات متقابل دوتایی و اثر متقابل سه‌تایی در سطح احتمال ۱ درصد، معنی‌دار است. در سرعت ۷ متر بر ثانیه در سه سطح رطوبتی ۷٪، ۱۳٪ و ۱۹٪ جداسازی کامل اتفاق افتاد. در سرعت ۵ متر بر ثانیه جداسازی برای پوست‌های متوسط و ریز و در سرعت ۳ متر بر ثانیه جداسازی فقط برای پوست‌های ریز اتفاق افتاد. نتایج این پژوهش می‌تواند در فرآیند طراحی و بهینه‌سازی جهت افزایش راندمان و کاهش زمان جداسازی مغز و پوسته بادام به‌کار گرفته شود.

واژه‌های کلیدی: بادام، جداساز پنوماتیکی، سرعت حد، نیروی درگ

مقدمه

بادام با نام علمی (*Prunus amygdalus*) متعلق به خانواده (Rosaceae) و زیر خانواده (Pronoideae) بوده، مغز آن حاوی انرژی زیاد، اسیدهای آمینه، قند و عناصر معدنی می‌باشد و مصارف مختلفی در صنایع دارویی، قنادی‌ها و عطرسازی دارد (Aydin, 2003). ایران از نظر تولید بادام پس از کشورهای آمریکا، استرالیا، اسپانیا و مراکش در رتبه پنجم جهان قرار دارد ولی درعین حال به دلیل عدم فراوری مناسب جایگاه ایران در بازار جهانی صادرات چندان مناسب نیست (FAO, 2016; Salem, 2011).

عملیات فراوری بادام شامل سه مرحله شکست پوسته چوبی، جداسازی مغز و بسته‌بندی آن است (Ebrahimi and Aarabi, 2011). به‌منظور طراحی دقیق ماشین‌های فراوری برای مرحله شکستن پوسته چوبی این محصول، تعیین خواص فیزیکی و مکانیکی آن مورد نیاز است. یکی از روش‌های مهم تفکیک مغز از پوسته چوبی استفاده از جداسازی پنوماتیک بوده و این روش می‌تواند برای درجه‌بندی، تمیزکردن و جداسازی مخلوط دانه‌های مختلف و مواد گیاهی مورد استفاده قرار گیرد (Thompson *et al.*, 1996). بنابراین، در فرآیند جداسازی پوسته چوبی از مغز بادام، تعیین خواص آئرودینامیکی هر دو گروه پوسته و مغز ضروری می‌باشد که می‌تواند این عملیات بر اساس تفاوت در اندازه، چگالی و سرعت حد اجزا، صورت پذیرد (Adewumi *et al.*, 2006). پژوهش‌های فراوانی در ارتباط با فرآیند درجه‌بندی، جداسازی و تمیزکردن محصولات مختلف کشاورزی انجام شده است.

در یک پژوهش برای شناسایی روش مناسب پالایش مغز بادام از پوست چوبی جداسازی پنوماتیک انجام شد. نتایج نشان داد که افزایش نرخ تغذیه، زاویه ورود مخلوط به تونل دستگاه و فاصله بین محل ورود مخلوط تا خروج مغز سبب کاهش بازده جداسازی پوست می‌شود. همچنین با تحلیل مخلوط خروجی از قسمت مغزها مشاهده شد که جداسازی تکه‌های پوست چوبی با طول بین ۲۰ میلی‌متر تا ۳۰ میلی‌متر به‌خوبی انجام نشده و حدود ۵۰٪ از آن‌ها در خروجی مغزها دیده شده است (Ebrahimi and Aarabi, 2017).

اثر رطوبت بر روی خواص فیزیکی و آیرودینامیکی دانه لوبیا چیتی بررسی شد که مقادیر خواص فیزیکی و آیرودینامیکی به‌طور معنی‌داری تحت تاثیر محتوای رطوبتی قرار داشتند ($p<0/01$)، به‌طوری که کمترین مقادیر خواص آیرودینامیکی مربوط به رطوبت ۸

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری
۲- دانشیار، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری
۳- استادیار، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری
(*- نویسنده مسئول: Email: r.tabatabaei@sanru.ac.ir)
DOI: 10.22067/jam.v11i2.81511

درصد بر پایه تر بودند (Sadeghi *et al.*, 2011). در پژوهشی سرعت حد دانه پسته و پوست پنج نوع از عمده‌ترین پسته‌های تجاری ایرانی یعنی اکبری، بادامی، کله قوچی، ممتاز و اوحدی، تحت تاثیر رطوبت و تنوع مورد مطالعه قرار گرفت. سرعت حد آجیل پسته از ۹/۸ به ۱۲/۴۴ متر بر ثانیه متغیر است، در حالی که سرعت حد مغز بین ۸/۳۰ تا ۱۱/۱۰ متر بر ثانیه است، اثر رطوبت بر سرعت حد پسته و مغز آن به‌صورت خطی با افزایش رطوبت افزایش می‌یابد (Razavi *et al.*, 2007). برای تسهیل در طراحی و تنظیم ماشین‌آلات در فرآیند جداسازی پنوماتیک دانه‌های انار رقم اشراف، ویژگی‌های آیرودینامیکی دانه انار، برگ و ترشحات موضعی مورد بررسی قرار گرفت. جداسازی آیرودینامیکی دانه انار از پیه و پوست موضعی، از لحاظ تئوری امکان‌پذیر است، اگر مقدار سرعت هوا با توجه به سرعت حد دانه انار تنظیم شود (Khodabakhshian *et al.*, 2018). به‌منظور جداسازی غده‌های سیب‌زمینی از سنگ و کلوخ، خواص آیرودینامیکی سیب‌زمینی مانند سرعت حد، ضریب درگ، عدد رینولدز برای طراحی یک جداساز پنوماتیک مورد بررسی قرار داده شد. مقادیر سرعت حد برای غده‌های سیب‌زمینی بیانگر این بود که جریان هوا می‌تواند برای جداسازی غده از سنگ و کلوخ استفاده شود (Abedi *et al.*, 2019). در تحقیقی امکان جداسازی زعفران (کلاله) از پرچم و گلبرگ با جریان عمودی هوا جهت مکانیزه کردن این عمل بررسی شد. تحلیل نتایج آزمایش‌های جداسازی معلوم کرد که تونل باد با سرعت ۸/۲ متر بر ثانیه و یک ساعت پس از برداشت بهترین راندمان جداسازی را دارد. در این سرعت ۸۴ درصد از پرچم‌ها و ۸۹ درصد از گلبرگ‌ها از تونل به‌بیرون پرتاب شده و ۸۱ درصد کلاله‌ها جدا شده و داخل تونل باقی ماند (Alishahi and Shamsi, 2012). به‌منظور طراحی صحیح و مناسب تجهیزات انتقال، برداشت و فراوری بادام، مشخصه‌های فیزیکی و خواص مکانیکی آن مورد بررسی قرار گرفت، که ضریب اصطکاک استاتیکی بادام و مغز آن به‌ترتیب روی شیشه و آهن گالوانیزه کمترین مقدار به‌دست آمد (Salimi *et al.*, 2016).

بررسی‌ها نشان داد اکثر پژوهش‌های صورت گرفته در دامنه تعیین خواص فیزیکی، مکانیکی و آئرودینامیکی بوده و در ادامه دستگاهی که بتواند عملیات جداسازی را انجام دهد توسعه نیافته است. در پژوهش حاضر ابتدا به بررسی خصوصیات فیزیکی، مکانیکی و آئرودینامیکی در سطوح مختلف رطوبتی پرداخته و در ادامه با استفاده از نتایج آن، به طراحی و ساخت و ارزیابی سامانه جداساز بادام از پوسته چوبی آن پرداخته و بهترین شرایط سامانه از نظر جداسازی و بازده معرفی شد.

مواد و روش‌ها

به‌منظور انجام آزمایش‌ها، نمونه‌های بادام رقم شکوفه (A.H.3) از باغات شهر مراغه واقع در استان آذربایجان‌شرقی تهیه شد. به‌منظور تعیین رطوبت پوسته، مغز و هر دوی آن‌ها، نمونه‌های جداشده مغز، پوست چوبی و مخلوط هر دوی آن‌ها آماده‌سازی شد و رطوبت آن‌ها به روش وزنی تعیین شد. نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد در اجاق آزمایشگاهی (آون) قرار داده شد و پس از گذشت این مدت زمان نمونه‌ها از آون خارج شده و توزین گردید. برای اندازه‌گیری جرم از ترازوی دیجیتال (Jadever ساخت کشور تایوان با دقت ۰/۰۱ گرم) استفاده شد و محتوای رطوبتی نمونه‌ها با استفاده از رابطه (۱) تعیین شد (Arana, 2012).

$$MC = \frac{m_1 - m_2}{m_1} * 100 \qquad (۱)$$

که در آن، MC میزان رطوبت محصول بر پایه‌ی تر (درصد)، m_1 جرم اولیه محصول (g)، m_2 جرم نهایی محصول پس از خشک شدن (g) می‌باشد.

گروه‌بندی نمونه‌ها

یکی از روش‌های گروه‌بندی محصولات کشاورزی، گروه‌بندی بر اساس ابعاد آن می‌باشد (Smith and Stroshine, 1985). بدین منظور ابعاد ۲۵ نمونه از تکه‌های پوست چوبی و مغز بادام برای هر گروه اندازه‌گیری شد که در مجموع ۱۰۰ نمونه برای چهار گروه انتخاب شد. کلیه‌ی خواص فیزیکی بادام با پنج تکرار انجام شد. برای تعیین خصوصیات ابعادی و جرم نمونه‌های مورد آزمایش، به‌ترتیب از یک کولیس دیجیتالی (Shoka gulf ساخت کشور اسپانیا با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر) و یک ترازوی دیجیتالی استفاده شد. برای طبقه‌بندی اندازه نمونه‌های مورد آزمایش، نمونه‌ها بر اساس توزیع نرمال به سه سطح بزرگ، متوسط و کوچک تقسیم‌بندی شدند. هم‌چنین مغز بادام به‌عنوان یک گروه مستقل مورد بررسی قرار گرفت.

به‌منظور بررسی خواص فیزیکی و آئرودینامیکی از هر گروه تعدادی نمونه انتخاب شد. انتخاب نمونه‌ها به گونه‌ای بود که شامل کوچک‌ترین عضو گروه تا بزرگ‌ترین عضو آن باشد. نمونه‌های انتخابی جهت شناسایی در تمام مراحل آزمایش شماره‌گذاری شدند.

ابعاد نمونه‌ها

به‌منظور تعیین ابعاد هندسی دانه‌ها، نمونه‌های شماره‌گذاری شده توسط ترازوی دیجیتال توزین و تعداد ۱۰۰ نمونه به‌صورت تصادفی انتخاب شد. سه بعد اصلی نمونه‌ها شامل قطر بزرگ، قطر متوسط و قطر کوچک توسط کولیس دیجیتال با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر اندازه‌گیری شد. از روی این سه بعد، قطر میانگین هندسی و ضریب کرویت به‌ترتیب با استفاده از روابط (۲) و (۳) تعیین شدند (Stroshine and Hamann, 1994).

$$d_g = \sqrt[n]{abc} \qquad (۲)$$

$$S_p = \frac{d_g}{a} \qquad (۳)$$

در این روابط، a، b و c به‌ترتیب قطر بزرگ، قطر متوسط و قطر کوچک دانه‌ها (mm)، dg قطر میانگین هندسی (mm) و S_p ضریب کرویت است.

جدول ۱- نحوه گروه‌بندی اجزای مخلوط

Table 1- How to group the mixture components

شماره گروه Group number	مشخصه کیفی Quality charactristics	مشخصه فیزیکی Physical charactristics
گروه (۱) Group (1)	پوست‌های کوچک Small shels	طول کم‌تر از 15 mm Length less than 15 mm
گروه (۲) Group (2)	پوست‌های متوسط Average shels	طول بین 15 mm – 20 Length between 15-20 mm
گروه (۳) Group (3)	پوست‌های بزرگ Large shels	طول بیش از 20 mm Length more than 20 mm
گروه (۴) Group (4)	مغز بادام Kernel	– –

خواص مکانیکی

به‌منظور تعیین خواص مکانیکی نمونه‌های بادام، از آزمون فشاری و منحنی نیرو-جابه‌جایی استفاده شد (Aydin and Ögüt, 1992). این آزمایش‌ها به‌وسیله دستگاه آزمون کشش-فشار (دستگاه تکسچر آنالایزر مدل CT3 کمپانی بروکفیلد آمریکا با ظرفیت لودسل ۵۰ کیلوگرم و دقت ٪ ۰/۵ ± در مقیاس کامل) انجام گرفت. به‌منظور تعیین نیروی شکست پوست چوبی و مغز بادام‌ها، تک تک نمونه‌های مورد آزمایش به صورت افقی در فاصله بین فک‌های ثابت و متحرک دستگاه قرار گرفت. بارگذاری به‌صورت شبه‌استاتیکی (با سرعت بارگذاری ۶ میلی‌متر بر ثانیه) انجام و هم‌زمان در حین بارگذاری داده‌های نیرو-جابه‌جایی تا لحظه شکست به‌دست آمد. تمامی آزمایشات در پنج تکرار انجام شد و نتایج آماری با نرم‌افزار SAS انجام گرفت و در همه آزمون‌های بارگذاری نخستین نقطه شکست به‌عنوان نیروی شکست ثبت گردید.

مقاومت غلتشی (زاویه پایداری در غلتش)

یکی از اطلاعات مهم در طراحی سامانه جداکننده بادام، تعیین مقاومت غلتشی یا بیشترین زاویه پایداری در غلتش است. برای محاسبه زاویه پایداری در غلتش، محصول مورد نظر را روی سطح حرکت می‌دهند تا از حرکت بایستد. این موقعیت به‌عنوان موقعیت تعادل اولیه در نظر گرفته شده و سپس سکویی را که دانه‌های بادام روی آن قرار دارد، با سرعت ثابت بلند می‌کنند تا محصول شروع به حرکت نماید. زاویه‌ای که در آن محصول شروع به حرکت کرده‌است همان زاویه پایداری در غلتش است (Razavi *et al.*, 2007).

به‌منظور ساخت ورقه مشبک داخل سامانه جداکننده، آزمایش‌های مربوط به اندازه‌گیری زاویه پایداری غلتش روی سه سطح توری مشبک، ورق استیل و تخته چندلا (MDF) با سه سطح رطوبتی انجام شد.

خواص آئرودینامیکی

به‌منظور طراحی سامانه جداکننده بادام، تعیین خواص آئرودینامیکی بسیار مهم می‌باشد. از مهم‌ترین خواص آئرودینامیکی سرعت حد و نیروی بادبردگی (درگ) می‌باشد (Tabak and Wolf, 1998). نیروی درگ (بادبردگی)، نیرویی است که از طرف جریان هوای متحرک بر اجسام وارد می‌شود. اهمیت این نیرو در عملیات انتقال و جداسازی پنوماتیکی از آن جهت است که تغییرات آن باعث تغییر مسیر حرکت اجسام در عملیات جداسازی یا انتقال خواهد شد (Gorial and O'callaghan, 1991). در پژوهش حاضر سرعت حد نمونه‌ها (مغز و پوسته چوبی آن) با استفاده از روش شناورسازی تعیین گردید (Keck and Goss, 1965) نمونه‌های کدگذاری شده بر روی شبکه توری قرار داده شد و با اعمال تغییر در دبی جریان هوای ورودی به محفظه تونل باد، نمونه تا لحظه معلق شدن پیش رفتند و با مشاهده به تعلیق رسیدن نمونه، سرعت هوا توسط بادسنج (مدل-M 4206, Lutron، ساخت کشور تایوان با دقت ۰/۱ متر بر ثانیه) به‌دست آمد.

مقدار نیروی درگ از رابطه (۴) محاسبه می‌شود (Gorial and O'callaghan, 1991).

$$F_d = \frac{1}{2} C_d . A . \rho_a . V_a^2 \qquad (۴)$$

در این رابطه F_d نیروی درگ (N)، C_d ضریب درگ (بدون بعد)، ρ_a دانسیته هوا ($kg\ m^{-3}$)، A سطح تصویر شده (m^2) و V_a سرعت هوا ($m\ s^{-1}$) است. محاسبه ضریب درگ با جای‌گذاری مقادیر سرعت حد اندازه‌گیری شده انجام گرفت .در این حالت با مساوی قرار دادن نیروی جاذبه و نیروی درگ خواهیم داشت:

$$C_d = \frac{2mg}{A . V_t^2 . \rho_a} \qquad (۵)$$

در این رابطه C_d ضریب درگ (بدون بعد)، m جرم دانه (g)، g شتاب ثقل ($m\ s^{-2}$)، V_t سرعت حد به‌دست آمده ($m\ s^{-1}$) می‌باشد.

طراحی و ساخت دستگاه

با بررسی پیشینه تحقیقات در این زمینه مشاهده شد طرح‌های مختلفی از دستگاه‌های جداساز پنوماتیک وجود دارد. هرچند که اصول اولیه جداسازی در تمام این طرح‌ها یکسان است اما گاه تفاوت‌هایی در مکان قرارگیری ورودی‌های هوا، مواد اولیه، خروجی مواد هدف و اضافات نیز در آن‌ها مشاهده می‌شود. این دستگاه شامل قسمت‌های مختلفی همچون تونل باد دستگاه، خروجی مواد سنگین، ورودی مخلوط اولیه، خروجی مواد سبک‌تر و دمنده هوا می‌باشد.

طراحی قسمت‌های مختلف دستگاه

تونل دستگاه

اولین مرحله در طراحی و ساخت دستگاه انتخاب شکل سطح مقطع و تعیین ابعاد آن است. سطح مقطع دستگاه براساس پارامترهایی از قبیل سادگی و هزینه‌های ساخت انتخاب می‌شود. فرض اولیه ساخت دستگاهی با قابلیت جداسازی ۲ کیلوگرم (محصول مخلوط) در دقیقه بود. ابعاد دستگاه با توجه ظرفیت دستگاه تعیین شد، بدین صورت که در قسمت طولی دستگاه صفحه مشبک شیب‌دار قرار گرفته و در طول این شیب باید کلیه عملیات جداسازی اتفاق می‌افتاد. زاویه شیب، سرعت حرکت مخلوط دانه و پوسته چوبی را تعیین کرده و بر اساس آن مدت زمان ماند محصول درون تونل باید تغییر می‌کرد. بر اساس آزمایش‌های صورت گرفته بر روی مقاومت غلتشی مخلوط دانه و پوست و همچنین آزمایش‌های اولیه مربوط به زمان ماند نمونه‌ها (دستگاه در ۳ قالب نمونه اولیه آماده‌سازی شد و آزمایش‌های اولیه در آن انجام گرفت)، طول دستگاه ۱۸ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. در ادامه عرض دستگاه با توجه به ظرفیت از پیش تعیین شده (۲ کیلوگرم در دقیقه) در حدود ۱۵ سانتی‌متر به‌دست آمد.

جریان کاملاً توسعه‌یافته

به‌منظور تعیین جریان یکنواخت درون لوله (تونل باد) اثر لزجت باید بررسی شده و لایه مرزی در آن تعیین گردد. پارامتر تاثیرگذار بر تعیین طول ورودی با جریان یکنواخت (L_e) عدد رینولدز است که توسط رابطه (۶) محاسبه می‌شود (Nabhani, 2001).

$$Re = V.D_H.\nu^{-1} \qquad (۶)$$

در این رابطه V سرعت جریان هوا ($m\ s^{-1}$)، D_H قطر لوله (m) و ν لزجت سینماتیکی سیال ($m^2\ s^{-1}$) می‌باشند.

$$D_H = \frac{2(a*b)}{a+b} \qquad (۷)$$

در رابطه (۷) D_H قطر معادل برای سطوح مکعب مستطیل و a و b طول و عرض مستطیل است (Nabhani, 2001). با استفاده از این رابطه قطر معادل برای تونل دستگاه ۱۶/۳۶ سانتی‌متر به‌دست می‌آید.

در محاسبه عدد رینولدز از مقدار لزجت سینماتیکی هوا در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد، برابر با $۱/۶۱\times۱۰^{-۵}$ متر مربع بر ثانیه استفاده شد که با جای‌گذاری اعداد و اطلاعات در رابطه (۶) عدد رینولدز ۸۱۸۰۰ به‌دست آمد که نشان می‌دهد جریان متلاطم است (Re>4000).

با توجه به تبعیت طول لازم برای توسعه‌یافتگی جریان از عدد رینولدز می‌توان گفت این طول تابعی از جریان است. رابطه (۸) معادله پذیرفته‌شده برای جریان آرام (Re<2300) است (Nabhani, 2001).

$$L_e/D_H = 0.06(Re) \qquad (۸)$$

در جریان متلاطم (Re>4000)، لایه‌های مرزی سریع‌تر رشد می‌کند و L_e نسبتاً کم‌تر است در این حالت طول لازم برای توسعه‌یافتگی جریان از رابطه (۹) محاسبه می‌گردد (Nabhani, 2001).

$$L_e/D_H = 4.4\ (Re)^{1/6} \qquad (۹)$$

طراحی سامانه جداساز در پژوهش حاضر بر اساس متلاطم‌ترین شرایط آزمایش در نظر گرفته شد. بیشترین سرعت جریان هوای مورد نیاز برای عملیات جداسازی ۸ متر بر ثانیه بود که در این صورت عدد رینولدز برای لوله از رابطه (۶) برابر با ۸۱۸۰۰ به‌دست آمد. با توجه به عدد رینولدز محاسبه شده جریان متلاطم بوده و با استفاده از رابطه (۹) $L_e=29.1\ D_H$ به‌دست آمد. با قرار دادن قطر ۱۶/۳۶ سانتی‌متر، مقدار طول مورد نیاز برای رسیدن به جریان کاملاً توسعه‌یافته ۴/۷۶ متر به‌دست آمد. بر این اساس فاصله بین دمنده تا خروجی ۴/۷۶ متر در نظر گرفته شد. از آنجا که این ارتفاع برای انجام آزمایش‌ها بسیار بالا بود، لذا آزمایش‌های اولیه برای تاثیر کاهش این ارتفاع انجام شد. نمونه‌های اولیه مدل‌هایی از جنس کارتن بودند که ارتفاع صفحه جداساز به‌طور پیوسته کاهش یافته و داده‌های مربوط به بازده جداسازی تعیین می‌گردید. این کاهش ارتفاع تا جایی ادامه یافت که اختلاف معنی‌داری از نظر جداسازی بین ارتفاع اصلی (۴/۷۶ متر) و ارتفاع تغییریافته مشاهده نشده باشد که برای طرح پیشنهادی اندازه ۲/۲۰ متر دارای نتیجه مشابه بود و جداسازی انجام گرفت.

ورودی مخلوط به دستگاه و خروجی مغز

پارامتر پر اهمیت در ساخت لوله سقوط، جنس و زاویه قرارگیری لوله سقوط می‌باشند که با توجه به داده‌های مربوط به زاویه غلتش به‌دست می‌آید. با توجه به تغذیه مخلوط بدون نیروی محرک و انجام آن به‌صورت ثقلی، زاویه قرارگیری این لوله در بدنه تونل دستگاه اهمیت زیادی پیدا می‌کند به‌طوری‌که اندازه این زاویه، تامین‌کننده سرعت حرکت مخلوط به درون دستگاه است. آزمایش‌های اولیه نشان داد که سطوح توری مشبک با لانه‌های یک میلی‌متری و زاویه شیب ۱۵ درجه بهترین حالت برای ساخت سامانه می‌باشد.

انتخاب دمنده

مهم‌ترین عامل در انتخاب دمنده، بررسی میزان توان و دبی مورد نیاز دستگاه بود که با داشتن ابعاد دستگاه و سرعت مورد نیاز جهت

جدایش می‌توان پمپ مناسب را انتخاب کرد. برای به‌دست آوردن دبی مورد نیاز از رابطه (۱۰) استفاده شد.

$$Q=A.V \quad (۱۰)$$

در رابطه (۱۰)، Q دبی ($m^3 h^{-1}$)، A مساحت تونل (m^2) و V سرعت مورد نیاز ($m\ s^{-1}$) است. با قرار دادن مقادیر در رابطه (۱۰) دبی مورد نیاز ۱۱۰۰ متر مکعب بر ساعت به‌دست آمد که به‌دلیل افت‌های موجود بر اثر توری و زانویی‌ها و افت خود پمپ از دبی بالاتری استفاده شد که دبی پمپ تهیه شده برابر با ۱۳۰۰متر مکعب بر ساعت است. با توجه به وجود قسمت‌های مختلف در سامانه برای تعیین توان مورد نیاز برای کار دستگاه ابتدا باید افت‌های انرژی مربوط به هر قسمت محاسبه گردد (Vakili Tahami, 2003).

$$P_{pump} = (\rho_{air} .A.V^3.\Sigma K_i).\ \eta^{-1} \quad (۱۱)$$

در این رابطه P_{pump} توان مورد نیاز دمنده (W)، ρ_{air} دانسیته هوا ($kg\ m^{-3}$)، A مساحت مقطع تونل دستگاه (m^2)، V سرعت هوای مورد نیاز ($m\ s^{-1}$)، η بازده دمنده و $\sum Ki$ مجموع ضرایب افت‌ها (افت انرژی سیال) در قسمت‌های مختلف تونل است. ضریب افت در مقطع دستگاه از رابطه (۱۲) محاسبه می‌شود.

$$K = f.L.D^{-1} \quad (۱۲)$$

در این رابطه f ضریب اصطکاک بین سیال (هوا) و دیواره تونل، L طول تونل (mm) و D قطر (mm) است. مقدار f از رابطه بلازیوس (Blasius) (رابطه (۱۳)) به‌دست می‌آید. این رابطه فقط برای لوله‌های صاف و تنها وقتی که عدد رینولدز بین ۲۳۰۰ و $۱۰^۵$ باشد کاربرد دارد.

$$f = 0.3164\ Re^{-0.25} \quad (۱۳)$$

عدد رینولدز از رابطه (۶) برابر با ۸۱۸۰۰ به‌دست آمد و با توجه به عدد رینولدز محاسبه شده، مقدار ضریب اصطکاک برابر خواهد بود با f=0.018، لذا مقدار ضریب افت K=0.24 برای مقطع کانال از رابطه (۱۲) به‌دست می‌آید.

به‌منظور محاسبه ضریب افت توری‌ها، پارامترهای تخلخل توری و عدد رینولدز سیم‌ها ($Re = V.\ D_w\ .v^{-1}$ که در این رابطه D_w قطر سیم‌هاست) و نیز فاکتور مش (بیان‌کننده اختلاف بین صافی و عدم صافی سیم‌ها) از اهمیت خاصی برخوردارند. تراکم مش ($\rho_w = w.m^{-1}$) و تخلخل آن با رابطه (۱۴) به هم مربوط می‌شوند (Vakili Tahami, 2003).

$$\beta_s = (1- D_w\,\rho_m)^2 \quad (۱۴)$$

در این رابطه β_s تخلخل توری، ρ_m تراکم مش و D_w قطر سیم (m) است. فاکتور مش برای توری‌های نو و کاملاً صاف ساخته شده برابر ۱، برای مواد فلزی که از لحاظ صافی متوسط هستند برابر ۱/۳ و برای مواد فلزی درجه سه، ۲/۱ پیشنهاد می‌گردد. با توجه به این اطلاعات ضریب افت توری از رابطه (۱۵) محاسبه می‌شود (Vakili Tahami, 2003).

$$K_t = K_{mesh}.\ K_{rn}.\sigma_s + (\sigma_s.\ \beta_s^{-1}) \quad (۱۵)$$

در این رابطه K_t ضریب افت توری است، σ_s صلبیت توری و برابر ($\sigma s=1- \beta_s$)، βs تخلخل توری، K_{mesh} فاکتور مش و K_{rn} ضریبی است که با توجه به عدد رینولدز توری‌ها به‌صورت زیر محاسبه می‌شود (Vakili Tahami, 2003). اگر عدد رینولدز برای سیم‌ها بین ۰ تا ۴۰۰ باشد K_{rn} از رابطه (۱۶) محاسبه می‌گردد.

$$K_{rn} = 1.795 – 0.00217Re \quad (۱۶)$$

و اگر عدد رینولدز سیمها بیش از ۴۰۰ باشد این ضریب (۱) خواهد بود. در نخستین گام عدد رینولدز سیمها برابر با ۷۴/۴۷۵ به‌دست می‌آید. با توجه به عدد رینولدز به‌دست آمده، K_{rn}=1.63 می‌شود. با توجه به صاف بودن توری‌ها فاکتور مش برابر یک در نظر گرفته شد. بنابراین ضریب افت توری از رابطه (۱۵)، K_t=0.544 محاسبه شد. در خطوط لوله و یا انتقال جریان وجود خم‌ها، زانویی‌ها و سه‌راهه‌ها نیز باعث افت می‌شوند. یکی از روش‌های به‌دست آوردن این ضرایب استفاده از جداول است. داده‌های این جداول اکثراً از داده‌های آزمایشی منتج شده‌اند. با مراجعه به جدول ضرایب افت برای اتصالات، ضریب افت زانویی ۰/۹ به‌دست می‌آید (Madani, 1995; Nabhani, 2001). با محاسبه جداگانه ضریب افت در هر قسمت، مجموع ضرایب به‌صورت زیر به‌دست می‌آید.

$$\Sigma K_i = 0.24+0.544+0.9=1.684$$

با کمک رابطه (۱۱) توان مورد نیاز دمنده به‌صورت زیر محاسبه می‌گردد.

$$P_{pump} = (\rho_{air}.A.V^3.\Sigma K_i).\ \eta^{-1}$$

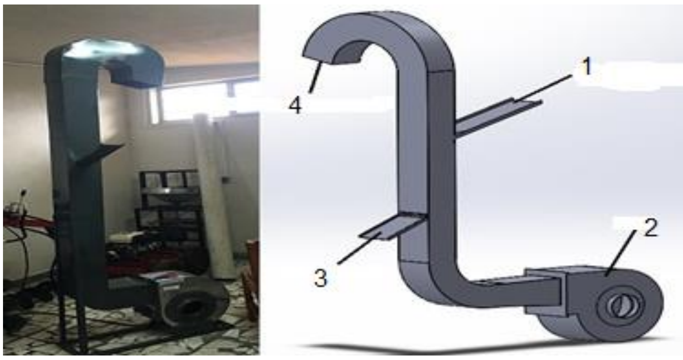
$$P_{pump} =18.42\ W$$

با استفاده از محاسبات انجام شده و به‌دست آوردن ابعاد مورد نیاز، طراحی طرح نهایی سامانه در محیط نرم‌افزار Solid works مطابق شکل ۱ بود.

ارزیابی

ارزیابی دستگاه ساخته شده مستلزم تعریف پارامترهای کمی (دو پارامتر بازده جداسازی پوست و خطای جداسازی مغز) برای سنجش میزان کارآیی آن است. هدف از طراحی و ساخت این دستگاه جداسازی پوست از مغز بادام می‌باشد، می‌توان پارامتر "بازده جداسازی پوست" را به گونه‌ای تعریف کرد که تابعی از میزان پوست جداشده از مخلوط باشد. به نحوی که هرچه میزان پوست جدا شده از مخلوط بیشتر باشد بازده جداسازی بالاتری حاصل شود. برای محاسبه بازده جداسازی پوست، مقدار پوست موجود در مخلوط اولیه توزین شد و پس از انجام جداسازی با دستگاه، میزان پوست جداسازی شده از مخلوط (میزان پوست به‌دست آمده در خروجی) اندازه‌گیری شد و با استفاده از رابطه (۱۷) بازده جداسازی پوست محاسبه شد (Panasiewicz *et al.*, 2006).

$$\eta = \frac{\text{جرم پوست خارج شده از قسمت پوست‌ها}}{\text{جرم پوست موجود در مخلوط}} \times 100 \quad (۱۷)$$



شکل ۱- دستگاه طراحی و ساخته شده؛ (۱) ورودی محصول، (۲) دمنده، (۳) خروجی مغز و (۴) خروجی پوسته و زائدات

Fig.1. Designed and manufactured apparatus; (1) Product input, (2) Fan, (3) Kernel output, and (4) Shell and waste output

پارامتر "خطای جداسازی مغز" به‌عنوان تابعی از میزان مغز خارج شده از قسمت خروجی پوست‌ها است، به‌نحوی که هرچه میزان مغز خارج شده از خروجی پوست‌ها بیشتر باشد خطای بالاتری در کارآیی دستگاه حاصل می‌شود. برای محاسبه آن، میزان مغز بادام موجود در مخلوط اولیه اندازه‌گیری و پس از انجام جداسازی با دستگاه، میزان مغز خارج شده از خروجی پوست اندازه‌گیری شده و با کمک رابطه (۱۸) پارامتر خطای جداسازی محاسبه می‌شود (Panasiewicz *et al.*, 2006).

$$\varepsilon = \frac{\text{جرم مغز خارج شده از قسمت پوست‌ها}}{\text{جرم مغز موجود در مخلوط}} \times 100 \qquad (۱۸)$$

برای بررسی عملیات جداسازی و ارزیابی دستگاه، پارامترهایی همچون سرعت دمنده، اندازه پوست و درصد رطوبت مخلوط به دستگاه هر یک در سه سطح مورد بررسی قرار گرفت. سرعت‌های ورودی جریان هوا به تونل باد ۳، ۵ و ۷ متر بر ثانیه، میزان رطوبت (۷٪، ۱۳٪ و ۱۹٪)، اندازه پوست‌ها در سه گروه، کوچک، متوسط و درشت بودند. تجزیه و تحلیل داده‌ها به‌صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار انجام شد و برای به‌دست آوردن مقایسه میانگین‌ها از آزمون دانکن و نرم‌افزار آماری SAS استفاده شد.

نتایج و بحث

جدول ۲ میانگین خواص هندسی شامل طول، عرض، ضخامت، قطر میانگین هندسی و ضریب کرویت برای مغز بادام و پوست چوبی به‌دست آمده را نشان می‌دهد.

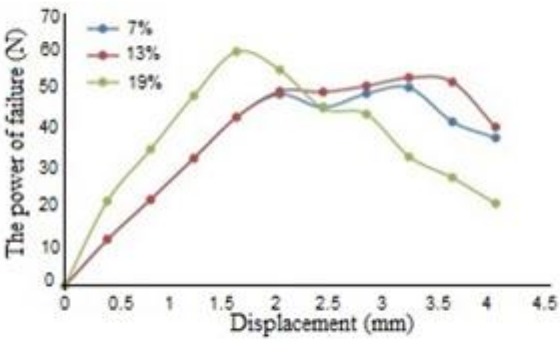
جدول ۲- داده‌های مربوط به خواص فیزیکی نمونه‌ها

Table 2- Data on physical properties of samples

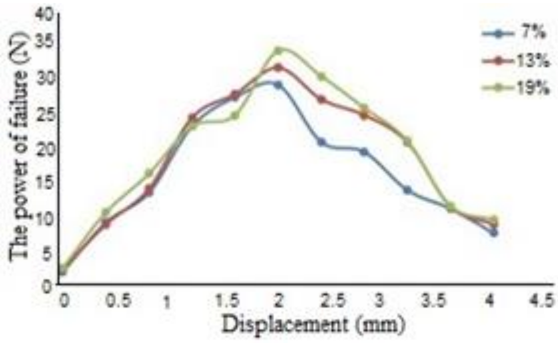
نمونه‌ها Samples	طول Length (mm)	عرض Width (mm)	ضخامت Thickness (mm)	قطر میانگین هندسی Geometric mean diameter (mm)	ضریب کرویت Sphericity factor
پوست‌های کوچک Small shels	13	9.9	3.5	7.66	0.59
پوست‌های متوسط Average shels	17.36	13.5	6.4	11.44	0.65
پوست‌های بزرگ Large shels	25.17	16.5	11.15	16.66	0.66
مغز بادام Kernel	20.64	13.25	7.4	12.64	0.612

خواص مکانیکی نمونه‌ها (نیروی شکست پوست چوبی و مغز بادام) در سه سطح رطوبت ۷٪، ۱۳٪ و ۱۹٪ اندازه‌گیری شد که در شکل‌های ۲ و ۳ آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد با افزایش درصد رطوبت نیروی شکست برای هر دو مورد پوست چوبی و مغز بادام افزایش می‌یابد که دلیل آن می‌تواند کاهش تردی مغز و پوسته چوبی و افزایش حالت الاستیکی مغز بادام و پوست چوبی آن و برخی خواص ساختاری باشد که نامنظمی موجود در نقطه بعد شکست ممکن است به‌دلیل افزایش نرمی باشد. نتایج به‌دست آمده با نتایج پژوهش (Salimi *et al.*, 2016) که بر خواص فیزیکی و مکانیکی بادام رقم ربیع کار کرده‌اند مشابه است. همچنین در پژوهشی دیگر

نتایج (Zhao *et al.*, 2011) در بررسی خواص فیزیکی و نیروی شکست جو نشان داد که نیروی شکست با میزان رطوبت افزایش می‌یابد. تعیین این نیروی شکست عامل تعیین‌کننده در میزان شکستگی پوسته چوبی بادام بوده، که بر اساس آن می‌توان دسته‌های کوچک، متوسط و یا بزرگ را تعیین و به دنبال آن بازده جداسازی را افزایش داد.



شکل ۲- نمودار جابه‌جایی- نیروی شکست برای مغز بادام
Fig. 2. Displacement - force for the kernel failure



شکل ۳- نمودار جابه‌جایی- نیروی شکست برای پوست
Fig. 3. Displacement force for the skin failure

جدول ۳- زاویه پایداری در غلتش روی سطوح مختلف (درجه)
Table 3- Angle of stability in rolling on different surfaces (degrees)

نمونه‌ها Samples	توری Net	ورق گالوانیزه Galvanized sheet	تخته چندلایه MDF
Moisture 7% رطوبت ۷٪			
پوست Shel	21	12	10
مغز بادام Kernel	10	9	6
مخلوط پوست و مغز Almond and skin mixture	15	10	8
Moisture 13% رطوبت ۱۳٪			
پوست Shel	15	11	10
مغز بادام Almond	10	9	7
مخلوط پوست و مغز Almond and skin mixture	13	10	8
Moisture 19% رطوبت ۱۹٪			
پوست Shel	14	10	9
مغز بادام Almond	10	9	7
مخلوط پوست و مغز Almond and skin mixture	12	9	7

نتایج به‌دست آمده از میزان زاویه غلتش در سطوح مختلف رطوبتی (جدول ۳) نشان داد که پوست بادام در تمامی سطوح رطوبتی بیشترین میزان زاویه غلتش را دارا می‌باشد که به دلیل شکل ناهمگون، لبه‌های شکسته و سطح زبر آن، حرکت آن روی سطح کند شده و در برخی مواقع مانع از حرکت می‌شود. از طرف دیگر مغز بادام دارای کمترین میزان زاویه غلتش بود که به‌دلیل وزن بیشتر مغز و شکل همگن‌تر و کروی‌تر نسبت به پوست چوبی است. همچنین نتایج به‌دست آمده نشان داد که با افزایش درصد رطوبت مقدار زاویه غلتش کمتر می‌شود که دلیل آن افزایش نسبی وزن نمونه‌ها بوده و این عامل غلتش را برای پوسته و مغز راحت‌تر می‌نماید. بررسی میزان

زاویه غلتش و جنس سطح نشان می‌دهد که بیشترین مقاومت غلتشی بین نمونه‌ها و سطح توری اتفاق می‌افتد که به‌دلیل زبری سطح، اصطکاک بیشتر بین نمونه‌ها و فلز می‌باشد. همچنین کمترین مقاومت غلتشی بین نمونه‌ها و سطح تخته‌ی چند لایه بود که دلیل آن سطح صاف و اصطکاک کمتر بین نمونه‌ها و چوب بود.

از آنجا که هدف از پژوهش حاضر طراحی و ساخت دستگاهی برای جداسازی پوست بادام از مغز آن می‌باشد لذا زاویه غلتش مخلوط پوست چوبی از مغز آن بسیار حائز اهمیت است. داده‌های به‌دست آمده نشان داد که زاویه غلتش برای مخلوط پوست چوبی بادام و مغز آن تقریباً برابر میانگین داده‌های جداگانه مغز و پوست چوبی است. از طرف دیگر مقایسه سطوح مختلف حرکتی نشان داد که بالاترین میزان زاویه مربوط به سطح توری می‌باشد. برای انتخاب جنس و نوع سطح باید این نکته را در نظر گرفت که سطح انتخابی علاوه بر این‌که نباید در عبور جریان هوا تاثیر زیادی بگذارد، از سقوط مواد به محفظه دمنده نیز جلوگیری کند. از این رو با توجه به سهولت تهیه، ارزانی و در دسترس بودن، از سطوح توری مشبک، برای طراحی سامانه جدایش استفاده گردید.

جدول ۴، نتایج به‌دست آمده از اندازه‌گیری سرعت حد نمونه‌های انتخاب شده از مغز و پوست را برحسب وزن آن‌ها نشان می‌دهد. نتایج آزمایش‌های اندازه‌گیری سرعت حد نمونه‌ها نشان داد که با توجه به اختلاف در مقدار سرعت حد پوست‌ها و مغز بادام انتخاب صحیح سرعت هوای دمنده در دستگاه جداساز، می‌تواند عامل مؤثر در افزایش راندمان جداسازی باشد. اختلاف موجود بین سرعت حد پوست و مغز بادام به دلیل وزن بیشتر و سنگین‌تربودن مغز نسبت به پوست است. البته باید گفت که شکل نمونه‌ها نیز تا حدودی تاثیرگذار خواهد بود به این صورت که پوست بادام شکل قوس‌دار و توخالی داشته و سطح تماس بیشتری با جریان هوا در تونل باد دارد و باد به راحتی می‌تواند آن‌ها را به حرکت درآورده و جابه‌جا کند. در حالی‌که مغز، شکلی صاف و توپر داشته و وزن بیشتری نسبت به پوست دارد که با توجه به ابعاد آن سطح تماس کمتری نسبت به پوست بادام دارد و در نتیجه سرعت حد آن بالاتر از پوست چوبی است. نتایج به‌دست آمده از بررسی سرعت حد در گروه‌بندی انجام شده با پژوهشی که (Ebrahimi and Aarabi, 2017) بر روی جداسازی پنوماتیک بادام رقم مامایی انجام دادند، مشابهت دارد.

جدول ٤– سرعت حد و نیروی درگ برای نمونه‌ها

Table 4- Terminal velocity and drag force for samples

نمونه‌ها Samples	جرم Mass (g)	سرعت حد Terminal velocity ($m\ s^{-1}$)	نیروی درگ Drag force (N)
پوست‌های کوچک Small shels	0.07 -0.22	1.8 – 2.5	15.08
پوست‌های متوسط Average shels	0.25 – 0.45	2.7 – 4.2	14.13
پوست‌های بزرگ Large shels	0.51 – 0.99	5.2– 6	11.5
مغز بادام Kernel	0.88 – 1.36	10.2 – 12.2	4.28

پس از اتمام محاسبات و آزمایش‌های مربوط به خواص فیزیکی و آیرودینامیکی محصول، دستگاه جداساز ساخته شد و مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج تجزیه واریانس تأثیر پارامترهای اندازه ذرات، سرعت باد و رطوبت بر میزان جداسازی پوست چوبی موجود در مخلوط بادام در جدول ۵ آورده شد. نتایج نشان داد که همه اثرات اصلی، اثرات متقابل دوتایی و اثر متقابل سه‌تایی عوامل در سطح احتمال ۱ درصد، معنی‌دار شد.

همان‌طور که در جدول نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل سه‌گانه مشاهده می‌شود (جدول ۶) در سرعت ۷ متر بر ثانیه اندازه ذرات و رطوبت تاثیری بر میزان جدایش نداشته است. با کاهش سرعت، میزان جدایش در اندازه ذرات متفاوت کاهش یافته است که به دلیل بیشتر بودن سرعت حد از سرعت جدایش می‌باشد. در سرعت پایین بهترین جدایش مربوط به اندازه ذرات ریز می‌باشد که به دلیل هماهنگی سرعت حد ذرات ریز و سرعت جدایش می‌باشد. رطوبت نیز تاثیر چندانی بر میزان جدایش نداشته و نتایجی نزدیک به هم حاصل شد که مربوط به سرعت حد می‌شود که تغییر زیادی با افزایش رطوبت در آن ایجاد نشد. نتایج به‌دست آمده برای رابطه سرعت حد و میزان رطوبت با نتایج (Sadeghi *et al.*, 2011) که بر روی خواص فیزیکی و آیرودینامیکی لوبیا چیتی گزارش کرده‌اند، مطابقت دارد.

جدول ۵- نتایج تجزیه واریانس اثر عوامل اندازه ذرات، سرعت و رطوبت بر درصد جداسازی

Table 5- Analysis of variance of particle size, speed and moisture on the separation percentage

منابع تغییرات Source	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean square
اندازه ذرات Particle size	3	0.73451**
سرعت Velocity	2	2.5369**
رطوبت Moisture	2	0.00467**
اندازه ذرات × سرعت Particle size × Velocity	6	0.51485**
اندازه ذرات × رطوبت Particle size × Moisture	6	0.00053**
سرعت × رطوبت Velocity × Moisture	4	0.00133**
اندازه ذرات × سرعت × رطوبت Particle size × Velocity × Moisture	12	0.00026**
خطا Error	70	0.0000036
کل Total	107	

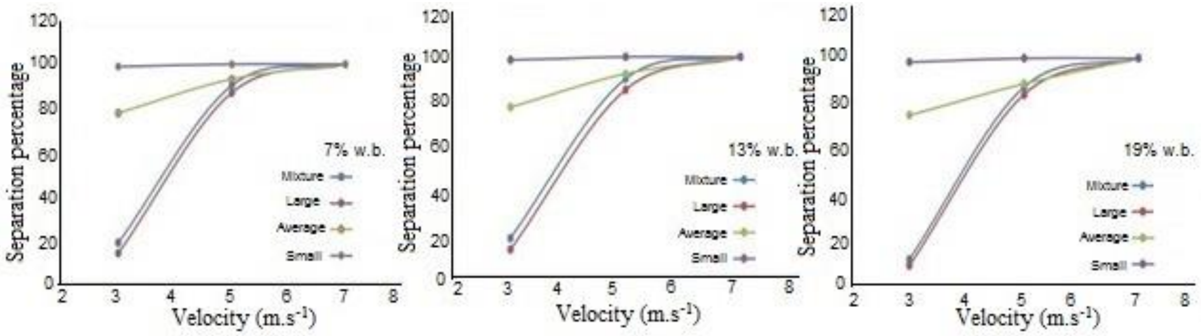
جدول ٦- نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل سه‌گانه اندازه ذرات، سرعت و رطوبت

Table 6- Mean comparison of the three-dimensional interaction of particle size, velocity and moisture

رطوبت Moisture (%)	سرعت Velocity (m s^{-1})	اندازه ذرات Particle size مخلوط Mixture	درشت Large	متوسط Average	ریز Small
	7	1.00^{a}	1.00^{a}	1.00^{a}	1.00^{a}
7%	5	0.903^{f}	0.869^{i}	1.00^{a}	1.00^{a}
	3	0.183^{o}	0.133^{q}	0.776^{l}	0.988^{b}
	7	1.00^{a}	1.00^{a}	1.00^{a}	1.00^{a}
13%	5	0.898^{g}	0.851^{j}	0.922^{e}	1.00^{a}
	3	0.169^{p}	0.115^{r}	0.771^{m}	0.984^{c}
	7	1.00^{a}	1.00^{a}	1.00^{a}	1.00^{a}
19%	5	0.871^{i}	0.842^{k}	0.887^{h}	1.00^{a}
	3	0.110^{s}	0.082^{t}	0.747^{n}	0.982^{c}

شکل ۴ نتایج آزمایش‌ها به‌منظور بررسی پارامترهای مختلف بر روند بازده جداسازی مغز بادام از پوسته چوبی آن و روند جدایش را در سطوح مختلف رطوبتی نشان می‌دهد. از نتایج مشاهده می‌شود که اختلاف چندانی در میزان یا درصد جدایش در رطوبت‌های مختلف وجود ندارد. با در نظر گرفتن این شاخص می‌توان زمان برداشت بادام را مدیریت کرده و با توجه به این‌که برای رساندن محصول به رطوبت کمتر باید عملیات خشک‌کردن انجام داد لذا این امر به نوبه خود مستلزم مصرف انرژی می‌باشد. در عین حال برداشت بادام در سطوح رطوبتی بالا، نیز عملیات شکستن پوسته را با انرژی یا نیروی شکست بالاتری مواجه ساخته (نتایج به‌دست آمده در شکل‌های ۲ و ۳) و این امر نیز چندان مطلوب نیست. نتایج به‌دست آمده در سطح رطوبت متوسط نشان داد که علاوه بر میزان جدایش قابل قبول (نسبت به

سطوح رطوبتی دیگر) در این سطح (۱۳٪)، می‌توان زمان برداشت این محصول را مدیریت کرد و از صرف انرژی‌های اضافی در فرآیند فرآوری این محصول جلوگیری کرد (بررسی‌ها نشان می‌دهد کشاورزان این محصول را در رطوبت ۱۵٪ برداشت می‌کنند Turkan *et al.*, 2007). همچنین بررسی اثر اندازه پوسته‌ها نشان داد که اختلاف بسیار زیادی از نظر جداسازی بین اندازهای کوچک و متوسط با اندازه‌های درشت وجود دارد. باید توجه داشت که شکستن پوسته‌های چوبی بادام به اندازه‌های ریز و یا متوسط مستلزم کار بیشتر و به دنبال آن مصرف انرژی بالاتری می‌باشد و در عین حال شکستن پوسته چوبی به اندازه‌های درشت نیاز به صرف انرژی پایین‌تر دارد(البته باید در نظر داشت تمامی این نتایج مربوط به سطح سرعت جداسازی ۳ متر بر ثانیه است). با افزایش سرعت جداسازی به ۵ متر بر ثانیه، درصد بازده جدایش برای تمامی اندازه‌ها به هم نزدیک شده و با افزایش این سرعت به ۷ متر بر ثانیه تمامی نتایج بر هم منطبق شده و عملاً اثرات سطح رطوبت و اندازه ذرات از بین می‌رود. باید توجه داشت که افزایش جریان هوا برای تونل بادی با سطح مقطع ۱۸ در ۱۵ سانتی‌متر (با فرض کار روزانه ۱۰ ساعت دستگاه) از ۵ به ۷ متر بر ثانیه، مصرف انرژی بالایی را به همراه خواهد داشت. از این رو بهترین حالت برای جدایش سرعت جریان هوای ۵ متر بر ثانیه، رطوبت ۱۳٪ و در شرایط ترکیب مغز با پوسته چوبی در تمامی ابعاد می‌باشد. در عین حال باید توجه داشت که در این تیمار آزمایشی تا حدودی عملیات جداسازی با اختلال انجام شده و مقداری از پوسته چوبی در مغز بادام وجود داشته که می‌توان با تکرار عملیات جداسازی میزان تمیز کردن محصول نهایی را افزایش داد.



شکل ٤– بازده جداسازی مغز بادام از پوسته چوبی در سطوح مختلف رطوبتی

Fig.4. The efficiency of separating almond kernel from the skin on different levels of moisture

نتیجه‌گیری

در بررسی عوامل موثر بر جداسازی پوسته و مغز بادام مشخص شد که اثرات عواملی مانند میزان خرد شده پوسته بادام، رطوبت محصول و سرعت جریان باد می‌تواند بر عملکرد و بازده کاری دستگاه تاثیر معنی‌داری داشته باشد. با افزایش سرعت جریان هوا، میزان جداسازی پوست از مغز افزایش می‌یابد. در سرعت ۷ متر بر ثانیه اندازه ذرات و رطوبت تاثیری بر میزان جدایش نداشت. با کاهش سرعت جریان باد، میزان جدایش در اندازه ذرات متفاوت کاهش یافت که به دلیل بیشتر بودن سرعت حد از سرعت جدایش می‌باشد. نتایج به‌دست آمده در سطح رطوبت متوسط نشان داد که علاوه بر میزان جدایش قابل قبول (نسبت به سطوح رطوبتی دیگر) در این سطح (۱۳٪)، می‌توان زمان برداشت این محصول را مدیریت کرد و از صرف انرژی‌های اضافی در فرآیند فراوری این محصول جلوگیری کرد. به‌طور کلی با در نظر گرفتن ملاحظات انرژی، زمان و کارآیی بهترین حالت برای جداکردن مغز از پوسته بادام، سرعت جریان هوای ۵ متر بر ثانیه و رطوبت ۱۳٪ بدون در نظر گرفتن ابعاد می‌باشد.

References

1. Abedi, G., S. Abdollahpour, and M. R. Bakhtiari. 2019. Aerodynamic properties of potato tubers to airflow separation from stones and clods. International Journal of Vegetable Science 25: 87-94.
2. Adewumi, B., O. Ademosun, and A. Ogunlowo. 2006. Preliminary investigation on the distribution and spread pattern of cowpea in a cross flow grain separator. Agricultural Engineering International: CIGR Journal 8: 648-654.
3. Alishahi, E., and M. Shamsi. 2012. Separation of Saffron Stigma from Stamen and Petal in a Vertical Wind Tunnel and Evaluation by Fuzzy Logic. Journal of Agricultural Machinery 2 (2): 120-126. (In Farsi).
4. Arana, I. 2012. Physical properties of foods: novel measurement techniques and applications. CRC Press, Taylor & Francis Group.
5. Aydin, C. 2003. Physical properties of almond nut and kernel. Journal of Food Engineering 60: 315-320.
6. Aydin, C., and H. Ögüt. 1992. Determination of deformation energy in some biological materials. Pages 254-264. National symposium on mechanisation in agriculture: Samsun.

7. Ebrahimi, R., and M. Aarabi. 2011. Study on the separation of almond kernel from its cracked shell in vertical and horizontal airstream. in In: 2nd National almond symposium:focous on export. Shahrekord, Iran. (In Farsi).
8. Ebrahimi, R., and M. J. Aarabi. 2017. Study on the pneumatic separation of almond (Mami cultivar) kernel from its cracked shell. Journal of Researches in Mechanics of Agricultural Machinery 10: 13-21. (In Farsi).
9. FAO. 2016. Statistics: Faostat-Agriculture, Production, Crops. http://www.faostat.fao.org.
10. Gorial, B., and J. O'callaghan. 1991. Separation of particles in a horizontal air stream. Journal of Agricultural Engineering Research 49: 273-284.
11. Khodabakhshian, R., B. Emadi, M. Khojastehpour, and M. R. Golzarian. 2018. Aerodynamic separation and cleaning of pomegranate arils from rind and white segments (*locular septa*). Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences 17: 61-68.
12. Madani, H. 1995. Hydraulic and fluid mechanics. Jahad-e Daneshgahi. Iran. (In Farsi).
13. Nabhani, N. 2001. Fluid Mechanics 2. Sharif univesity. Iran. (In Farsi).
14. Panasiewicz, M., K. Zawiślak, E. Kusińska, and P. Sobczak. 2006. Purification and separation of loose materials in a pneumatic system with vertical air stream. Teka Komisji Motoryzacji i Energetyki Rolnictwa.–Lublin 6: 171-176.
15. Razavi, S. M., A. Rafe, and R. Akbari. 2007. Terminal velocity of pistachio nut and its kernel as affected by moisture content and variety. African Journal of Agricultural Research 2: 663-666.
16. Sadeghi, M., M. Abbasi, and A. Masoomi. 2011. Physical and Aerodynamic Properties of Pinto Bean Grain as Affected by Moisture Content. Iranian Journal of Biosystems Engineering 41: 145-152. (In Farsi).
17. Salem, J. 2011. Investigating Iran status in production and world trade of almond. in In: 2nd National almond symposium:focous on export. Shahrekord, Iran. (In Farsi).
18. Salimi, M., M. Gholami, S. Mohseni, and E. Abdolalizade. 2016. Determination and Investigation of Some Physical and Mechanical Properties of Almond (Rabi Variety). Journal of Food Technology and Nutrition 13: 65-74. (In Farsi).
19. Smith, R., and R. Stroshine. 1985. Aerodynamic separation of cobs from corn harvest residues. Transactions of the ASAE 28: 893-0897.
20. Stroshine, R., and D. Hamann. 1994. Physical properties of agricultural materials and food products. Course manual: Purdue University Press, West Lafayette Indiana.
21. Tabak, S., and D. Wolf. 1998. Aerodynamic properties of cottonseeds. Journal of Agricultural Engineering Research 70: 257-265.
22. Thompson, J., T. Rumsey, and J. Connell. 1996. Drying, hulling, and shelling. Almond Production Manual: 268-273.
23. Turkan, A., R. Polat, and U. Atay. 2007. Comparison of Mechanical Properties of Some Selected Almond Cultivars with Hard and Soft Shell under Compression Lading. Journal of Food Engineering 30: 773-789.
24. Vakili Tahami, A. 2003. Pump selection manual. Aydin. Iran. (In Farsi).
25. Zhao, Z., Y. Li, J. Chen, and J. Xu. 2011. Grain separation loss monitoring system in combine harvester. Computers and Electronics in Agriculture 76: 183-188.

Journal of Agricultural Machinery
Vol. 11, No. 2, Fall- Winter 2021, p. 173-185

نشریه ماشین‌های کشاورزی
جلد ۱۱، شماره ۲، نیمسال دوم ۱۴۰۰، ص ۱۸۵-۱۷۳

Effect of Parameters on the Separation of Almond Shell and Kernel, and Design and Development a Pneumatic Separator

V. Neisari fam[1], R. Tabatabaeekoloor[2*], A. Motevali[3]

Received: 26-06-2019
Accepted: 11-09-2019

Introduction

Almonds (*Prunus amygdalus*) belongs to the family of Rosaceae and the subspecies of Pronoideae. Its kernel contains a lot of energy, amino acids, sugars and mineral elements. Iran is ranked fifth in terms of producing almonds after United States, Australia, Spain, and Morocco, but at the same time, Iran's position is not very suitable in the world export market. The processing of this product involves three stages of shell breaking, kernel separation, and packaging. One of the important methods of separation of the kernel from the wooden crust is the use of pneumatic separation and this method can be used to grade, clean, and separate the seeds of different materials.

Materials and Methods

Almond samples of the Shokofeh variety (A.H.3) were obtained from Maragheh gardens in East Azarbaijan province. The moisture content of the shell, the kernel, and mixture of them was determined using the oven drying method. Also, some physical and mechanical properties were measured. In order to design the almond separator system, it is important to determine aerodynamic properties. The most important aerodynamic properties such as terminal velocity and drag force were determined. The first step in designing and manufacturing a device is to select the cross-sectional shape and dimension. The cross-section of the machine is selected based on parameters such as simplicity and construction costs. With the assumption of a machine with a separation capacity of 2 kg (mixed product) per minute, the length and the width of the machine were obtained to be 18 cm and 15 cm. Using the terminal velocity and dimensional data, the blower distance to the outlet, the tunnel length, the power and flow rate of the blower were calculated and then the design and construction were done. To evaluate the separation and evaluation of the apparatus, parameters such as blower speed, shell size, and moisture content of the mixture were investigated for each parameter at three levels. Airflow rates of the wind tunnel were 3, 5, and 7 m s^{-1}, moisture content (7%, 13%, and 19%), shell size in three groups: small, medium, and large.

Results and Discussion

The average geometric properties including length, width, thickness, geometric mean diameter, and spherical coefficient for almonds were 20.64, 13.25, 7.4, 12.64 mm, and 0.612, respectively, as well as properties for large shells (25.17, 16.5, 11.15, 16.66 mm, and 0.66), for average size (17.36, 13.5, 6.4, 11.44 mm, and 0.65) and fine size (13, 9.9, 3.5, 7.66 mm, and 0.59), respectively. The mechanical properties of the samples (shell and almond kernel) were measured at three levels of moisture content of 7%, 13%, and 19%. The results showed that by increasing the moisture content, the fracture force for both shell and kernel increases. Almond shell had the highest angle of rotation at all levels of moisture. This was due to its heterogeneous shape, broken edges and rough surface. On the other hand, almonds had the lowest degree of rotation, due to the greater weight of the kernel and the more homogeneous and spherical shape than the shell. The results obtained from measuring the terminal velocity of the samples selected from the kernel and shell in terms of their weight indicated that the velocity limit for the almonds was 10.2-12.2 m s^{-1} and for the shell, the range was 1.8-6 m s^{-1}. The variance analysis of the effect of particle size, velocity, and moisture parameters on the level of separation of shell in almond mixture showed that all major effects and interactions of factors were significant at 1% probability level. Particle size and moisture content did not affect the separation rate at 7 m s^{-1}. With decreasing velocity, the separation rate in the particle size was reduced, which was due to the higher speed of the separation rate. At low velocity, the best separation was related to the fine particle size, which was due to the harmonization of the fine particle velocity and the separation rate.

Conclusions

Pneumatic separation of almond kernel and shell was affected by air velocity, particle size and moisture content. As the flow rate increases, the amount of shell separation from the kernel increases. Particle size and

1- Master student, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari
2- Associate Professor, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran
3- Assistant Professor, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran
(*- Corresponding Author Email: r.tabatabaei@sanru.ac.ir)

moisture content did not affect the separation rate at 7 m s^{-1}. The results at medium moisture content indicated that in addition to the acceptable separation level (relative to other moisture levels) at this level (13%), the harvesting time of this product can be managed and the use of additional energy in the processing of this product is prevented.

Keywords: Almond, Drag force, Pneumatic separation, Terminal velocity